

莫尔条纹非等速运动的等转角处理

The Equiangular Disposal Algorithm of Moire Fringe Signal

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 赵长海¹ 万秋华¹ 孙莹^{1,2}
ZHAO Chang-hai WAN Qiu-hua SUN Ying

摘要:当编码器非匀速运动的时候,所采集到的莫尔条纹信号为非等转角信号,为了对信号进行傅立叶分析,需要将采集到的数据转换为等转角数据。分析了在非等转角的情况下进行傅立叶分析所产生的误差,利用线性插值方法,提出了进行等转角处理的快速计算方法。通过仿真验证该方法能很好的将非等速运动还原为等速运动。

关键词:莫尔条纹;光电编码器;等转角处理;傅里叶分析

中图分类号:TP274

文献标识码:A

Abstract: The encoder, when non-uniform movement, the collection to the Moire fringe signals is non-equiangular signals, to carry on the Fourier's analysis to the signal, needs the data conversion to equiangular data. Analyzed in non-equiangular situations has carried on the error which the Fourier's analysis produced, Using the theory of linear interpolation, the equiangular disposal algorithm of moire fringe signal is researched. Confirms this method through the simulation to be able very good to return non-equiangular signals into the equiangular signals.

Key words: Moire fringe; Optoelectronic encoder; Equiangular disposal; Fourier algorithm

1 引言

光电轴角编码器作为精密测量角位移的一种重要工具,已在精密仪器、高精度精密加工等领域得到了广泛的应用。基于光栅的角位移测量技术是以光栅相对移动所形成的莫尔条纹信号为基础的,即由于光栅的相对移动,使透射光的光强度呈周期性变化,这种光强信号经光电管变为周期性变化的电信号(正弦波信号),对此信号进行一系列的处理,可获得光栅的相对移动量,通常采用对两路正交的正弦信号进行细分来达到精密测量的目的。测角误差是编码器的一项重要技术指标,细分误差是测角误差的主要分量。为了检测编码器的动态细分误差,须将编码器的两路正弦信号进行数据采集之后,利用傅立叶变换计算信号的谐波,与标准信号进行比对,计算出细分误差。

对采集的数字信号进行傅立叶变换分析谐波之前,该信号必须是等转角的数字序列,否则无法进行傅里叶变换。采集卡进行数据采集时,通常采样频率是固定的,如果编码器进行匀速转动,则采集到的信号就是等转角的数字序列,可以直接进行傅立叶分析;如果编码器不是匀速转动,则采集到的数字序列就不是等转角序列,需要进行等转角处理之后,才能进行傅立叶分析计算编码器的细分误差。本文首先推导非等速运动时进行傅立叶变换所产生的计算误差,提出了将非等转角信号转换为等转角序列的算法原理,仿真实验证明,通过该方法能很好的将非等速运动的莫尔条纹信号转换为等速运动时的莫尔条纹信号。

2 非等速运动所产生的计算误差

编码器光电信号的细分技术是建立在一定的信号波形(通常为正弦波或者三角波)基础上,当波形参数偏离预定参数时,便会产生细分误差。假设采集到的两路等转角信号分别为 u_a 和

u_b , 则细分误差用相位差表示就是实际细分点相位 $\tan^{-1}(\frac{u_a}{u_b})$ 与理论细分点相位 $\tan^{-1}(\frac{\sin\theta}{\cos\theta})$ 的差值,所以细分误差的计算公式可以表示为:

$$d\theta = \tan^{-1}(\frac{u_a}{u_b}) - \tan^{-1}(\frac{\sin\theta}{\cos\theta}) \quad (1)$$

假设编码器的信号为标准的正弦信号,当进行非等间隔采样时也可以引入计算误差。设莫尔条纹信号以等加速运动,加速度为 a ,初速度为 v_0 。则因为非等间隔采样所引入的计算误差为:

$$d\theta = \tan^{-1}[\frac{\sin(v_0 t + 0.5at^2)}{\cos(v_0 t + 0.5at^2)}] - \tan^{-1}(\frac{\sin(v_0 t)}{\cos(v_0 t)}) = 0.5at^2 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,非等间隔采样计算编码器的细分误差时,随着采样点的增加,计算误差会越来越大。加速度越大,则计算误差也越大,且和采样序列成指数变化,所以,必须对非等间隔的采样序列进行等间隔处理后才能进行误差计算。

3 非等速运动的等转角处理

因为采集卡采集数据时采样频率是固定的,即按等时间序列采集的,所以采集的数据是时间的函数,设某时间序列满足下式: $u_a = f(t)$

如果该信号的运动状态为二次运动,初速度为 v_0 ,加速度为 a ,位移为 s ,则位移与时间的关系为:

$$s = v_0 t + 0.5at^2 \quad (3)$$

即: $t = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2as} - v_0}{a}$ 。当 s 取等间隔数据时,则序列

$$u_a' = f(\frac{\sqrt{v_0^2 + 2as} - v_0}{a}) \quad (4)$$

为等间隔序列。由式(4)可以看出,把等时间序列转换为等间隔序列,关键是求出初速度 v_0 以及加速度 a 。

采集卡采集到的数据并非连续数据,而是等时间的一组数字序列,因为编码器输出的每个莫尔条纹信号周期的间距是固定的,所以所采集到的正弦信号每个正弦周期所对应的距离是

一样的。设每个莫尔条纹信号所对应的间距为 θ , 采集卡的采样周期设为 1。则只需要知道编码器移动连续两个莫尔条纹周期的时间, 即可以算出莫尔条纹的初速度和加速度, 就能利用式(4)进行等间隔数据处理了。为了将误差减到最小, 计算每个莫尔条纹信号时是以信号过零点为基准的。

实际的数据采集过程中, 很难采集到编码器莫尔条纹信号过零的时刻, 只能通过插值的方法计算。设莫尔条纹第一次过零点的时刻在序列 x_m 到 x_{m+1} 之间, 即满足 $x_m < 0 \leq x_{m+1}$ 或者 $x_m > 0 \geq x_{m+1}$ 。根据线性插值的原理, 莫尔条纹第一次过零点的时刻为:

$$t_1 = m + \frac{|x_m|}{|x_m| + |x_{m+1}|} \quad (5)$$

同理可以求出莫尔条纹第 2、第 3 次过零点的时刻为 t_2, t_3 。则编码器移动每个莫尔条纹所经过的时间分别为 $T_1 = t_2 - t_1, T_2 = t_3 - t_2$ 。因为每个莫尔条纹的长度都为 θ , 根据公式(3)则可以列如下方程:

$$\begin{cases} v_0 T_1 + 0.5aT_1^2 = \theta \\ v_0(T_1 + T_2) + 0.5a(T_1 + T_2)^2 = 2\theta \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可以求出莫尔条纹的初速度和加速度分别为:

$$\begin{cases} a = \frac{2\theta(T_1 - T_2)}{T_1 T_2 (T_1 + T_2)} \\ v_0 = \frac{\theta(T_2^2 - T_1^2 + 2T_1 T_2)}{T_1 T_2 (T_1 + T_2)} \end{cases} \quad (7)$$

根据初速度和加速度, 则可以计算莫尔条纹的等间隔序列, 假设计算之后的莫尔条纹等间隔序列为:

$$x' = \{x_0', x_1', \dots, x_{m-1}', x_m'\} \quad (8)$$

则 $x_0' = 0$, 第 m 个点所对应的采样时刻为:

$$t_m = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2as} - v_0}{a} + t_1 \quad (9)$$

其中 t_1 为第一次过零点的时刻。运用线性插值的方法, 可计算出第 m 个点所对应的数值为:

$$x_m' = x_{[t_m]} + (t_m - [t_m]) \times (x_{[t_m]+1} - x_{[t_m]}) \quad (10)$$

其中 $[t_m]$ 为 t_m 取其整数部分, 即采样时间的整数部分。根据此计算得到的等间隔序列就可以进行傅立叶变换求其谐波, 根据式(1)可以计算编码器的动态细分误差。

运用式(10)所得到的等间隔序列有可能其最大值小于原始莫尔条纹信号的峰值, 因为莫尔条纹在其峰值部分的变化率很小, 所以由此计算所带来的计算误差可以忽略不计。本算法的插值都是采用的线性插值, 由此也可以引入计算误差。但当采样点比较多时(每个莫尔条纹周期采样点个数大于 60)此误差也可以忽略不计。

4 仿真验证

在编码器实际的工作现场, 编码器可能是做变加速运动, 如果以匀加速计算也可能引入计算误差。这种计算误差在编码器加速度较小时可以忽略不计。在高精度编码器中, 编码器移动一个莫尔条纹的距离是很短的, 可以认为编码器是做匀加速运动。假设编码器的一路莫尔条纹信号的波形参数如表 1 所示, 并假设莫尔条纹的运动方程为 $s = t + 0.002t^2$, 采集卡的采样频率为 64Hz, 则信号图形如图 1 所示。

利用公式(5)计算莫尔条纹信号的三个过零时刻 t_1, t_2, t_3 分别为 43.71、94.04、137.88。利用式(6)~(10)得到莫尔条纹的等间隔序列如图 2 所示。对图 2 的数据进行傅里叶变换, 得到莫尔条

纹信号的谐波参数如表 1 所示。对图 1 的信号如果不进行等间隔处理, 直接选取一个信号周期进行傅里叶变化, 得到莫尔条纹信号的谐波参数也放在表 1 中比较。

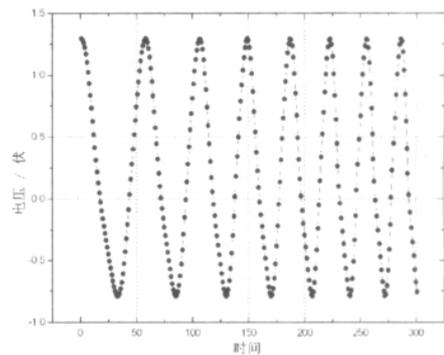


图 1 莫尔条纹信号图形

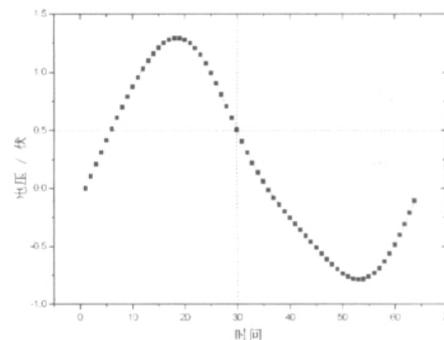


图 2 等间隔的莫尔条纹信号

表 1 信号的谐波参数

	仿真信号参数	等间隔数据处理之后的计算值	未进行等间隔处理的计算值
直流电平	0.2	0.19974	0.1933
基波幅值	1	0.9986	0.91
基波相位	0	0	0
二次谐波幅值	0.1	0.0995	0.1084
二次谐波相位	$\pi/4$	$(1-0.1\%) \times \pi/4$	$(1+26.2\%) \times \pi/4$
三次谐波幅值	0.05	0.0494	0.0344
三次谐波相位	$-\pi/3$	$-(1-0.09\%) \times \pi/3$	$-(1+12.7\%) \times \pi/3$

通过表 1 可以看出, 对非等间隔的莫尔条纹信号进行等间隔处理之后, 进行傅里叶变换得到的信号谐波参数非常接近真实的莫尔条纹信号参数; 如果不进行等间隔处理, 直接进行傅里叶变换得到的莫尔条纹信号参数与真实的信号参数差别较大, 不能真实的还原莫尔条纹信号的波形。当莫尔条纹非等速运动时, 为了求出信号的谐波参数, 就必须先对采集到的莫尔条纹信号进行等间隔处理, 再进行傅里叶变换计算谐波参数。

在实际的计算中有时需要连续采集 3 个完整的莫尔条纹信号, 根据前两个莫尔条纹周期的信号计算加速度, 再根据后两个莫尔条纹周期信号计算加速度, 如果两种方法计算的加速度误差大于 5%, 则认为编码器的加速度变化比较大, 此时不宜进行数据分析, 继续进行下一次采样重新计算。

5 结论

本文提出了对非等间隔莫尔条纹信号数据进行等间隔处理的一种方法, 该方法主要是针对编码器非等速转动时采集到的信号为非等间隔信号, 傅立叶分析时必须转换为等间隔数据时使用。具有算法简单、计算速度快等优点, 适合在计算机上处理大量的数据, 也适合在 DSP 上进行数据的实时快速处理。

(下转第 43 页)

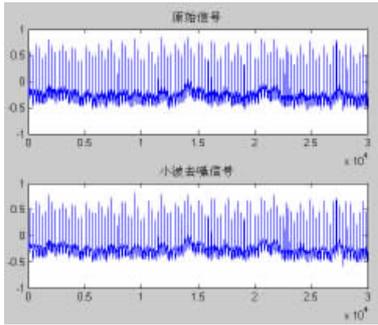


图 6 小波滤波后的信号

Fig.6 Result of WT

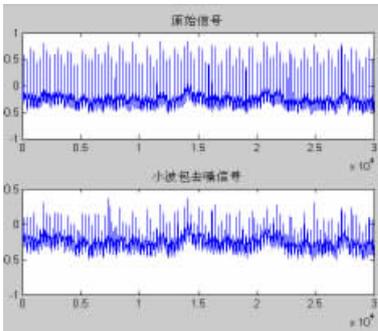


图 7 小波包滤波后的信号

Fig.7 Result of WPT

为了进一步比较小波分析与小波包分析这两方法的滤波效果,利用信噪比和均方差这两个指标来对滤波效果进行衡量。其参数值如表 1 所示。

表 1 两种滤波方法信噪比和均方差比较
Table 1 Comparison of parameter MSE and SNR with the two methods

滤波方法	信噪比	均方差
小波分析	112.2699	2.6713e-004
小波包分析	148.1272	0.0088

表 1 从信噪比和均方差这两个方面反映出小波包滤波结果要优于小波滤波。

6 总结

通过以上的理论分析和仿真实验研究,小波与小波包这两种信号分析方法对 ECG 的滤波都起到了一定的效果。从仿真结果中我们不难发现小波包对信号滤波处理的结果要优于小波分析的结果。

本文的创新点在于:在心电信号的预处理方面采用了的信号具有更加优良去噪效果的小波包方法,并采用熵标准实现最优基选择。同时对小波去噪与小波包去噪性能进行了比较。

参考文献

[1]Manuel Blanco-Velasco. ECG signal denoising and baseline wander correction based on the empirical mode decomposition. Computer in Biology and Medicine 38(2008):1-13.
 [2]魏阳,索忠伟,李文容.数字滤波器在实时滤除心电干扰中的设计与应用[J].微计算机信息,2006,4-2:40-42.
 [3]郑凯梅,余生晨.心电信号的小波变换滤波算法的改进.山东生物医学工程,2003, 22 (1) :22-23
 [4]Koichi Kuzume Nijima, K, Takano, S. Design of a Lifting Wavelet Processor for One Dimensional Signal Detection. IEEE International Midwest Symposium on Circuits and 63 Systems,

2004; 47:421

[5]范显峰,姜兴渭.基于小波包变换的信号去噪方法研究.哈尔滨工业大学学报.2003,35(7):809-811.

[6]Jansen M. Noise reduction by wavelet Threshold -Ing [M]. Newyork:Spring-Verlag ,2001

[7]Qiao Hu, Zhengjia He, Zhouso Zhang, Yangyang Zi, Fault diagnosis of rotating machinety based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble. Xian Jiaotong University, 21(2007): 688-705

[8]Donoho DL.De-noising by Soft-Threshold holding. IEEE Transaction Information Theory,2003,41(3):613-627.

作者简介:李昕(1970,2-),女,博士,燕山大学电气工程学院生物医学工程专业,教授,主要研究领域为智能信息处理。

Biography:LI Xin (1970-), female, PHD degree. Professor of Electrical engineering institute, Yanshan University. Research interest: intelligent information processing.

(066004 秦皇岛 燕山大学生物医学工程研究所) 李 昕 孙媛媛 (Yanshan University Institute of Biomedical Engineering, Hebei province Qinhuangdao 066004, China) LI Xin SUN Yuan-yuan

通讯地址:(066004 河北秦皇岛市 燕山大学西校区 1317 信箱) 孙媛媛

(收稿日期:2009.02.02)(修稿日期:2009.05.02)

(上接第 13 页)

本文作者创新点:提出了将非等间隔的莫尔条纹信号数据转换为等间隔数据的方法,转换后的数据在进行傅里叶变换时能够得到更接近原始信号的谐波参数。该方法具有算法简单、计算速度快、适合在计算机上处理大量的数据等优点。

参考文献

[1]唐晖,叶险峰,李向军.一种基于 FPGA 的光栅莫尔条纹数字细分技术[J]. 计量技术, 2006,10:14-17.
 [2]余琳,冯长有,丁林辉.两步法测量编码器测角误差[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1), P66-70.
 [3]卢新然,李洪,冯长有.光电轴角编码器细分误差的 Matlab 仿真评估方法[J]. 微计算机信息, 2005,10-1:109-110.
 [4]赵波.绝对式三级组合光电轴角编码器[J].微计算机信息, 2008, 5-1:12-14.

作者简介:赵长海(1980.4-),男,汉族,中国科学院长春光机所助理研究员,主要从事光电轴角编码器的研究。

Biography:ZHAO Chang-hai, male, Han, 1980, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. The major research direction is the optoelectronic axis-angle encoder.

(130033 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 赵长海 万秋华 孙莹

(100049 北京 中国科学院研究生院) 孙莹 (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun,130033, China) ZHAO Chang-hai WAN Qiu-hua SUN Ying

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China) SUN Ying

通讯地址:(130033 长春市经济技术开发区东南湖大路 3888 号 长春光机所光电传感室) 赵长海

(收稿日期:2009.01.14)(修稿日期:2009.04.14)